

PSPICE를 이용한 소프트 스위칭 ZVT컨버터 효율 비교와 분석

김윤호, 김수홍, 이강희, 김승모
중앙대학교

Comparison and Analysis of the Soft-Switching ZVT Converters in Efficiency Using PSPICE

Yoon-Ho Kim, Su-Hong Kim, Kang-Hee Lee, Seung-Mo Kim
CHUNG-ANG University Electrical & Electronics Eng.

ABSTRACT

Presently, a high frequency switching technique is used for a converter design to reduce its size and weight. However an increased switching frequency introduces a high switching loss. To the reduce switching loss, soft switching techniques using ZVS and ZCS are applied. It is very important to improve efficiency. However in general to develop new converter circuits, the efficiency and other performance parameters can be determined after design, implementation and experiments. The idea in this paper is to determine and predict efficiency and other operating characteristics without realization and experiments. Thereby a complex design and implementation can be avoided. PSPICE is used as a simulation tool. This is verified by comparing simulation and experiments results of the two different soft switching converters.

1. 서 론

오늘날 컨버터는 고주파 스위칭 기술을 도입하여 소형, 경량화를 추구하고 있다. 그러나 이러한 컨버터들의 고주파 스위칭 동작은 스위치의 순간적인 턴-온, 턴-오프에 따른 전력장비의 스위칭 스트레스, 스위칭 손실 등을 야기한다^[1]. 또한 고주파 스위칭 동작으로 인해 야기되는 고조파는 역률을 저하시킨다. 이 같은 문제점을 해결하기 위해 ZVS (Zero-Voltage-Switching), ZCS(Zero-Current-Switching)공진 컨버터 등이 제안되었다^{[2][3]}. 소프트 스위칭 기술은 고 효율, 고 역률, 고 전력 밀도가 적용된 컨버터 시스템들이 개발을 가능하게 하고 있다. 일반적으로 새로운 회로를 개발하는 경우

효율을 포함한 동작성능 등의 확인은 실제 회로를 설계하고 제작하여 이를 실험한 후에만 가능하다는 문제점이 있다. 본 논문에서는 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 실험을 통하지 않고 효율 등을 실제와 근사하게 예측할 수 있음을 보이고자 한다. 이를 위하여 소프트 스위칭 컨버터를 대상으로 PSPICE를 이용한 시뮬레이션 상에서 역률 개선기능을 가지며, 게이트 신호를 제어하여 ZVS, ZCS 동작특성을 갖는 시스템을 구성하고 실제 컨버터 회로의 효율과 스위칭 동작을 예측하고 분석할 수 있는 방법을 제시하였다. 시뮬레이션 결과와 실제 시스템의 실험을 통하여 측정된 결과를 비교함으로써 시뮬레이션의 성능을 확인하고자 한다.

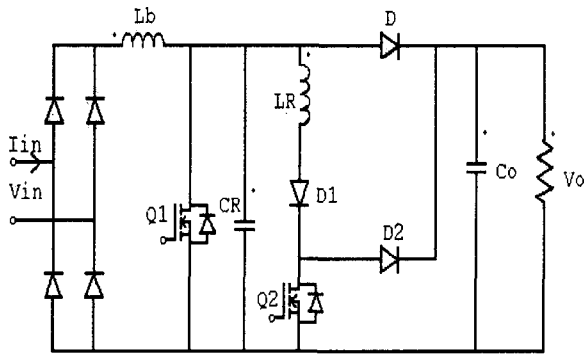
2. 소프트 스위칭 컨버터

전력 컨버터는 일반적으로 점점 높은 전력 밀도를 추구하고 있다. 이를 위한 방법으로 필터(filter) 구성요소의 크기를 작게 하기 위해 스위칭 주파수를 증가시킨다. 그러나 스위칭 주파수를 증가시켜 100kHz이상의 스위칭 주파수에서 시스템의 스위칭 손실은 현저히 증가되었다. 이러한 단점을 극복하기 위해 기존의 컨버터 보다 효율을 향상시키고 스트레스를 감소시키기 위해 새로운 부류의 컨버터들이 개발되었다. 컨버터 스위치의 ZVS, ZCS 동작과 입력 전류를 입력 전압과 동상이 되도록 제어하고, 고조파 율(THD : Total Harmonic Distortions)은 3%이하에서 0.999의 역률이 가능하도록 제어한다^[4]. 본 논문에서는 실험을 위하여 두 가지 형태의 소프트 스위칭 컨버터를 대상으로 PSPICE를 위한 ZVS, ZCS 소프트 스위칭 기능을 구현하였으며 이들 두 회로의 동작원리 및 특성을 검토하였다.

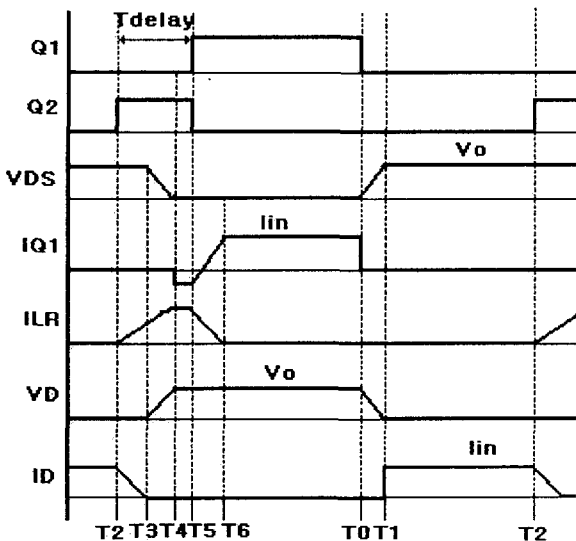
2.1 소프트 스위칭 ZVT 부스터 컨버터 (컨버터 I)

제안된 회로의 특징은 스위칭 전압/전류 파형을

나타내기 위해 스위치와 정류기에 직렬로 공진 인덕터가 사용되었다. 소프트 스위칭은 이 공진 인덕터와 공진 커패시터 사이의 공진에 의해 달성되었다. 소프트 스위칭 ZVT 컨버터 회로에서 스위칭 소자가 턴-온하기 이전에 스위칭 소자 전압을 영 전압으로 감소시킬 필요가 있다. 이것은 스위칭 소자가 턴-온시 ZVS 동작을 하기 위한 것이다. 그림 1은 소프트 스위칭 ZVT 부스터 컨버터의 주 회로와 각 구간별 동작 파형을 보여주고 있다. 이 회로는 보조 공진 스위치(Q_2), 다이오드(D_1, D_2), 공진 인덕터(L_R), 공진 커패시터(C_R) 및 블로킹 다이오드(D), 주 스위치(Q_1)로 이루어 졌다. 이들 공진 소자들은 소프트 스위칭 동작을 위해 스너버(Snubber) 회로로 동작된다.



(a)



(b)

그림 1. 소프트 스위칭 ZVT 부스터 컨버터
(a) ZVT 컨버터 주회로 (b) 이상적인 각 구간별 동작 파형

Fig. 1. Soft-switching ZVT boost converter
(a) ZVT main circuit (b) Ideal operating waveforms

각 구간의 동작 특성을 살펴보면 주기 $T_0 - T_1$ 에서는 보조 스위치 S_{Q2} 는 오프상태이고, 주스위치 S_{Q1} 은 온에서 ZVS로 턴-오프된다. 공진 커패시터 C_R 은 dv/dt 에 의해 제어되기 때문에 초기에 주스위치 S_{Q1} 의 드레인 전압을 0V로 한다. 이로 인해 주스위치 턴-오프 스위칭 손실을 상당히 줄일 수 있다. $T_1 - T_2$ 구간에서는 일반적인 PWM 부스터 컨버터의 free-wheeling 단계와 동일하다. $T_2 - T_3$ 구간은 다이오드 D는 도통상태가 유지되며, T_2 에서 보조스위치가 턴-온된다. 또한 공진 인덕터의 전류는 선형적으로 증가하여 입력 전류 I_{in} 에 도달한다. 이 구간의 시간 간격은 아래와 같다.

$$T_{23} = \frac{I_{in}}{V_o/L_R} \quad (1)$$

$T_3 - T_4$ 에서는 공진 인덕터와 공진 커패시터 사이에 공진이 발생하여 주스위치의 역 병렬 다이오드가 도통하기 시작한다. 시간 간격은 공진 주기의 1/4이 되므로 아래와 같다.

$$T_{34} = \frac{\pi}{2} \sqrt{L_R C_R} \quad (2)$$

$T_4 - T_5$ 구간에서는 주스위치의 역 병렬 다이오드가 온 상태이며, ZVS실현을 위해 다이오드가 도통중일 때 주스위치의 턴-온 게이트 신호가 인가되어 ZVS실현된다. 또한 보조스위치의 시간 지연을 아래의 부등식을 만족해야 한다.

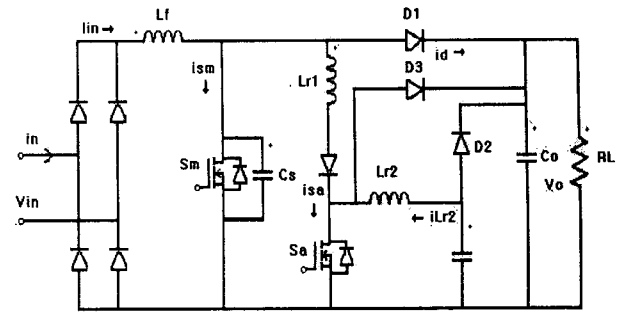
$$T_{delay} \geq T_{23} + T_{34} = \frac{I_{in}}{V_o/L_R} + \frac{\pi}{2} \sqrt{L_R C_R} \quad (3)$$

$T_5 - T_6$ 구간에서는 보조스위치는 턴-오프이고 주스위치는 턴-온이 된다. 공진 인덕터에 저장된 에너지는 보조 다이오드(D_1, D_2)를 통해 부하로 선형적으로 방출된다. $T_6 - T_7$ 구간에서는 다이오드 D_1 이 턴-오프 되고, 입력전류 I_{in} 은 주 스위치를 통해 전원으로 free-wheeling 하는 단계이다. 이 회로의 특징은 스위치의 ZVS, ZCS 동작으로 인해 스위칭 손실이 감소하고, 이 스위칭 동작으로 전압 및 전류 스트레스를 줄일 수 있다.

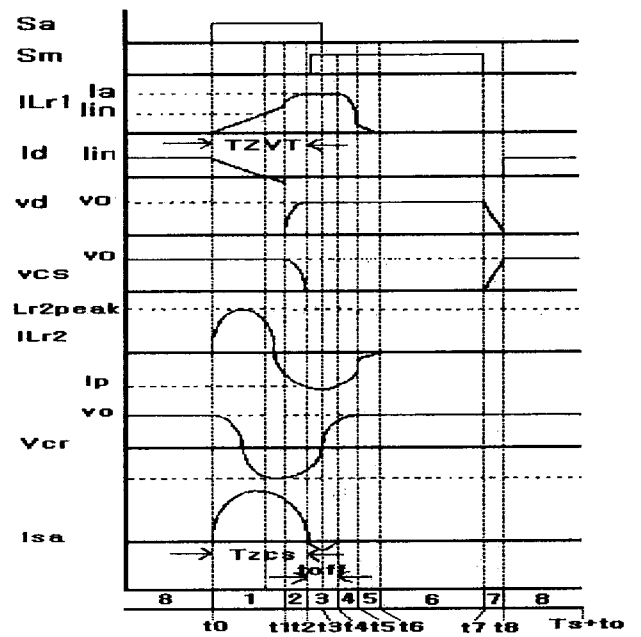
2.2 ZCS 보조회로를 사용한 ZVT부스터 컨버터 (컨버터 II)

ZVT회로는 $\frac{dv}{dt}$ 로 제어된 부스터 다이오드의 소프트 턴-오프와 주스위치의 영 전압 턴-온이 확

실한 보조 공진 회로를 가지고 있다. 그리고 포화 인덕터 또는 RC손실 스너버는 주 스위치가 온 했을 때 보조 스위치 커패시터와 공진 인덕터 사이의 기생 진동을 억제하기 위해 사용된다. 그림 2는 AC-DC PFC를 응용한 ZCS보조 회로를 가지고 있는 ZVT부스터 컨버터를 보여주고 있다. 보조회로는 두 개의 공진 인덕터(L_{r1}, L_{r2}), 공진 커패시터(C_r), 스너버 커패시터(C_s), 보조스위치(S_a), 다이오드(D_2, D_3, D_4)를 포함하고 있다. 또한 공진 인덕터 L_{r1} 은 입력 인덕터 L_f 와 같은 코어로 흐르고, 스너버 커패시터는 주 스위치의 커패시턴스와 부스터 다이오드 D_1 의 결합 커패시턴스를 포함한다. 그리고 이 동작 파형의 분석을 위해 모든 구성요소들은 이상적인 것으로 가정하였고, 입력 필터 인덕터는 입력 전류 리플이 무시될 만큼 충분히 크다고 가정되었고, 출력 커패시터는 출력 전압의 스위칭 사이클이 일정할 만큼 충분히 크다고 가정하였다. 이 회로의 각 구간별 동작특성을 살펴보면, $T_0 - T_1$ 구간의 시작에서 주 스위치와 보조스위치는 오프 상태이고 전류는 부스터 다이오드 D_1 을 통하여 흐른다. T_0 에서 보조스위치 S_a 는 턴-온되며 공진 커패시터 C_r 은 인덕터 L_{r2} 와 공진을 시작한다. 보조스위치에 흐르는 전류는 인덕터 L_{r1}, L_{r2} 의 합이다. 이 회로에 제안된 상태 방정식은 참고문헌에 제공되었다^[2]. $T_1 - T_2$ 구간에서는 L_{r1} 을 통하여 흐르는 전류는 L_{r1}, C_s 의 공진에 의해 계속 증가되며, 인덕터 L_{r2} 에 흐르는 전류는 이 구간에서 시간이 지남에 따라 음(negative)으로 간다. $T_2 - T_4$ 구간에서는 주 스위치는 $T_2 - T_3$ 에서 ZVS로 턴-온되고, 보조스위치는 $T_2 - T_4$ 에서 턴-오프 된다. 이 구간의 끝에서 두 공진 인덕터 전류의 합은 양으로 회복된다. $T_4 - T_5$ 구간에서는 두 공진 인덕터와 함께 충전된 공진 커패시터는 공진을 시작한다. $T_5 - T_6$ 구간에서는 입력 인덕터의 과도 에너지는 다이오드 D_2, D_3 를 통하여 출력으로 방출된다. $T_6 - T_7$ 구간에서는 주 스위치는 여전히 턴-온이며, 입력 에너지는 입력 인덕터로 축적된다. 이것은 PWM 부스터 컨버터의 이상적인 동작특성이다. $T_7 - T_8$ 주 스위치는 턴-오프되며, 스너버 커패시터 C_s 의 전압은 I_{in} 에 의해 선형적으로 증가된다. $T_8 - (T_s + T_0)$ 구간은 부스터 PWM 컨버터의 이상적인 free-wheeling 단계이다.



(a)



(b)

그림 2. ZCS보조회로를 사용한 ZVT부스터 컨버터

(a) ZVT부스터 컨버터 주 회로

(b) 이상적인 각 구간별 동작 파형

Fig 1. ZVT boost converter using a ZCS auxiliary circuit

(a) ZVT main circuit (b) Ideal operating waveforms

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 이론적 배경

시뮬레이션 상에서 구현된 효율은 아래와 같이 표현된다.

- 출력 부하 전압 평균값 V_{dc}
- 출력 부하 전류 평균값 I_{dc}
- 출력 dc 전력

$$P_{dc} = V_{dc} I_{dc} = \frac{V_{dc}^2}{R} \quad (4)$$

- 입력 전압의 실효값 V_{rms}
- 입력 전류의 실효값 I_{rms}
- 입력 ac 전력

$$P_{ac} = V_{rms} I_{rms} \quad (5)$$

- 효율 η

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} = \frac{V_{dc} I_{dc}}{V_{rms} I_{rms}} \quad (6)$$

그리고 입력역률(Power Factor)은 다음과 같이 구해진다.

$$PF = \frac{V_{rms} I_{rms(1)} \cos \theta}{V_{rms} I_{rms}} = \frac{I_{rms(1)}}{I_{rms}} \cos \theta = K_d K_q \quad (7)$$

$$K_d = \frac{I_{rms(1)}}{I_{rms}}, \quad K_q = \cos \theta \quad (8)$$

그림 3은 역률 방정식을 사용하여 구한 K_d, K_q 의 관계를 전압과 전류 파형으로 표현한 것이다.

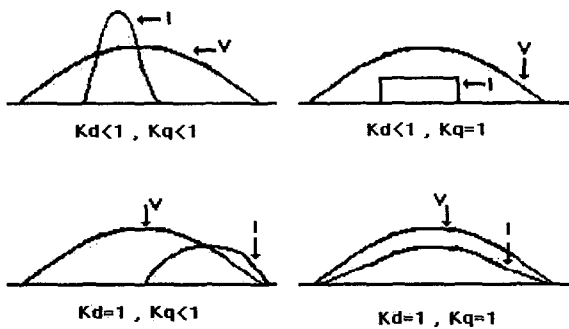


그림 3. K_d, K_q 에 따른 전압-전류 파형

Fig 3. Voltage-Current waveforms by K_d, K_q

또한, 고조파율은 아래의 방정식에 의해 나타낸다.

$$THD = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_{rms(1)}^2}}{I_{rms(1)}} \times 100 \quad (9)$$

식 (8)를 대입하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$THD = \sqrt{\frac{1}{K_d^2} - 1} \times 100 \quad (10)$$

제어회로는 전압 보상기(Voltage Compensator), 전류 검

출회로(Current sytheisize), 곱셈기(Multiplier), 전류 보상기(Current compensator), ZVT 제어회로로 구성되었다. 회로의 동작은 입력 전압과 전류를 동상으로 유지시키기 위해 전압 오차 증폭기의 출력과 입력에서 검출된 전류, 전압이 곱셈기로 들어간다. 증폭기의 (+)입력은 곱셈기의 출력, (-)입력은 저항을 통하여 전류 검출회로의 출력에 연결된다. 또 전류 오차 증폭기의 출력은 PWM비교기에서 톱니파와 비교되어 시비율을 결정짓는다. 이러한 제어를 통해 출력 전압을 일정하게 유지시키고, PFC 기능을 제어하고, ZVT 스위칭 동작을 실현할 수 있다^[5]. 그림 4는 영 전압 스위칭(ZVS), 영 전류 스위칭(ZCS)스위치 구조를 보여주고 있다.

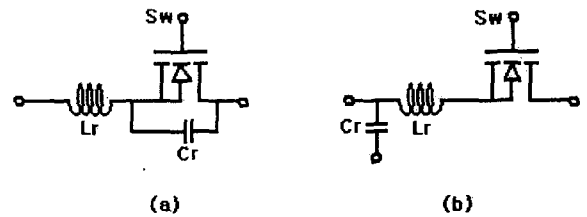


그림 4. ZVS, ZCS 스위치 구조

(a) ZVS 스위치 회로 (b) ZCS 스위치 회로

Fig 4. Switch configuration of ZVS, ZCS

(a) ZVS switch circuit (b) ZCS switch circuit

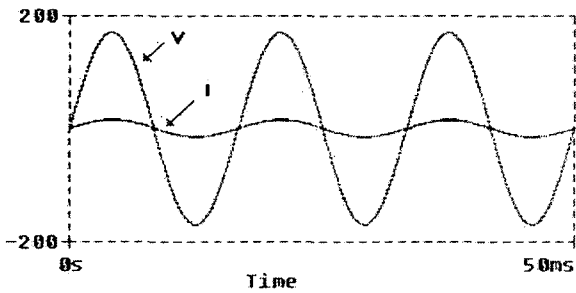
그림 4-(a)는 ZVS 스위칭을 위해 공진 커패시터 C_r 은 스위치 S_w 에 병렬로 연결되었다. 이것은 스위치 S_w 가 턴-오프 할 때, 스위치로 흐르는 전류는 공진 커패시터 C_r 로 흐르지 때문에 스위치 전압은 증가하여 V_o 로 충전된다. 따라서 스위치 드레인 전압의 dv/dt 는 C_r 에 의해 제어되어 초기에 주스위치 드레인 전압은 0V가 된다. 그림 4-(b)는 ZCS스위칭 동작을 위한 구조이다. 공진 인덕터 L_r 이 스위치 전류의 di/dt 를 제한한다. 스위치가 턴-오프시 드레인 전압의 한정된 기울기 때문에 스위치 소자가 가지고 있는 내부 커패시터로 전류가 흐른다. 이것은 스위칭 손실의 원인이며, 스위칭 주파수가 높아질수록 손실도 커진다.

3.2 시뮬레이션 결과 및 분석

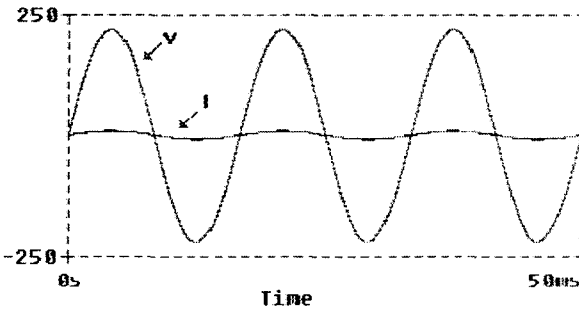
위에서 제시된 컨버터들의 주스위치와 보조스위치의 ZVS와 ZCS 동작을 시뮬레이션으로 고찰하였다. 또한 각 회로의 효율을 식 (6)을 사용하여 시뮬레이션 상에서 구현하였다. 컨버터 1은 입력 전압 170[V], 출력 전압 400[V], 전류5[A], 스위칭주파수 100[kHz]인 컨버터가 설계되었다. 입력 인덕터(L_b)는 350[uH], 공진 커패시터(C_R)와 공진 인덕터(L_R)는 각각 300[pF], 6[uH]를 사

용하였다. 출력 커패시터 (C_o)는 940[uF]을 사용하였다. 블록킹 다이오드 (D)는 MUR1560(최대전압 : 600V, 최대 전류 : 15A, 역 회복 시간 : 60ns)를 사용하였다.

또한 컨버터 2는 입력 전압 220[V], 출력 전압 380[V], 스위칭주파수는 100[kHz], 600W인 컨버터가 설계되었다. 입력 인덕터 (L_i)는 500[uH], 공진 인덕터 (L_{r1}, L_{r2})는 각각 10.8[uH], 2.6[uH]가 사용되었고, 스너버 커패시터 (C_s)는 1.5[nF], 공진 커패시터 (C_r)은 6.35[nF]을 사용하였다.



(a)



(b)

그림 5. 입력 전류-전압 시뮬레이션 파형

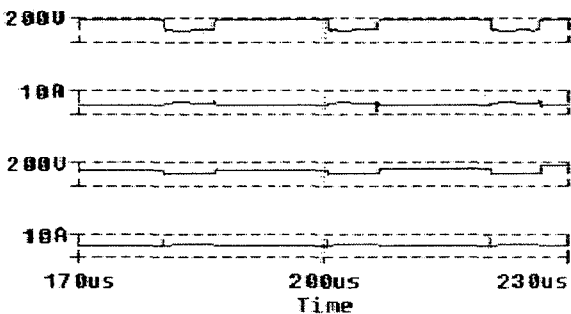
(a) 컨버터 1의 입력 전압-전류 파형

(b) 컨버터 2의 입력 전압-전류 파형

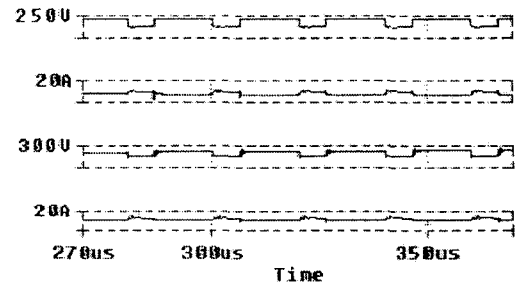
Fig5. Simulation waveforms of input voltage and current

(a) Input voltage-current waveforms of converter 1 (b)

Input voltage-current waveforms of converter 2



(a)



(b)

그림 6. 주스위치와 보조스위치 시뮬레이션 동작 파형

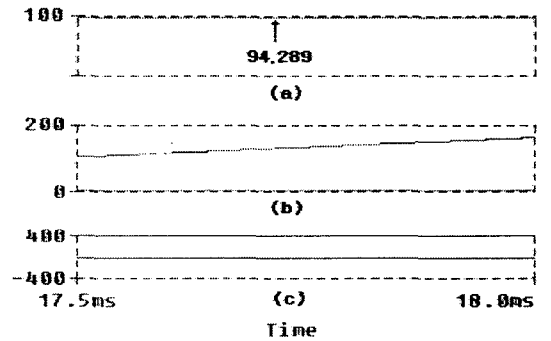
(a) 주스위치와 보조스위치 전압-전류 파형(컨버터1)

(b) 주스위치와 보조스위치 전압-전류 파형(컨버터2)

Fig 6. Simulation waveforms of the main switch and auxiliary switch

(a) Voltage-Current waveforms of the main and auxiliary switch(converter 1)

(b) Voltage-Current waveforms of the main and auxiliary switch(converter 2)



(c)

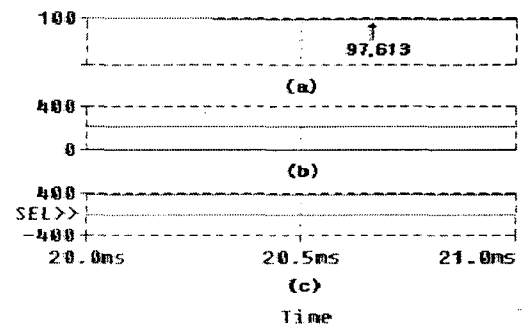
그림 7. 효율의 시뮬레이션 출력 파형(컨버터 1)

(a) 효율 (b) 입력 전압-전류 (c) 출력 전압-전류

Fig 7. Simulation waveforms of the efficiency (converter 1)

(a) Efficiency (b) Input voltage-current

(c) Output voltage-current



(c)

그림 8. 효율의 시뮬레이션 출력 파형(컨버터 2)

(a) 효율 (b) 입력 전압-전류 (c) 출력 전압-전류

Fig 8. Simulation waveforms of the efficiency (converter 2)

(a) Efficiency (b) Input voltage-current

(c) Output voltage-current

그림 5의 출력 결과에서 시뮬레이션 결과와 실험결과가 유사한 출력을 보여주고 있다. 전압과 전류는 동상을 유지하고 있으며, 이것은 PFC동작을 의미한다. 그림 6은 주스위치와 보조스위치의 동작 파형을 보여주고 있다. 논문에서 제시된 것처럼 주스위치는 턴-온, 턴-오프시 ZVS 동작을 나타내고 있으며, 보조스위치는 턴-온시 ZCS동작을 턴-오프시는 하드스위칭(Hard-switching)을 나타낸다. 그림 7은 컨버터 1과 컨버터2의 효율의 파형을 보여주고 있다. 컨버터 1은 대략 94%, 컨버터 2는 97% 이상의 효율을 보여주고 있다. 이것은 논문에서 실험으로 측정된 값과 거의 일치함을 표 1에 보여주고 있다.

표 1. 효율 비교

Table 1. Comparison of efficiencies

출력 종류	효 율	
	시뮬레이션	실험
컨버터 I	94.289%	94.7%
컨버터 II	97.613%	97.5%

4. 결 론

본 논문에서는 새로운 컨버터 설계 및 개발시 컨버터 스위칭 동작, 효율, 역률 등의 특성을 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 실제 제작 실현 및 실험을 통하지 않고도 측정할 수 있음을 보였다. 소프트 스위칭 ZVT부스터 컨버터와 ZCS 보조회로를 사용한 ZVT부스터 컨버터회로를 대상으로 하여 시뮬레이션을 통해 스위칭 동작과 효율의 특성을 고찰하였다. 또한 시뮬레이션 결과를 실제 컨버터의 출력 특성과 비교하여 상호 유사함을 확인하였다. 본 논문에서 제시하는 결과는 각 컨버터회로의 동작 특성, 효율 등을 미리 예측할 수 있도록 함으로써 새로운 회로의 설계와 개발시 비용과 시간을 크게 절약할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] Bellar. M. D., Wu. T. S., Tchamdjou. A., Mahdavi. J., Ehsani. M., "A review of soft-switched DC-AC converters", IEEE Transactions on ,Vol. 34, pp. 847 -860, 1998.
- [2] Gurunathan. R., Bhat. A. K. S., "ZVT boost converter using a ZCS auxiliary circuit" ,IEEE Transactions on, Volume: 37, pp. 889 -897, 2001.
- [3] Hua. G., Lee. F. C., "Soft-switching techniques in PWM converters", IEEE Transactions on , Vol. 42, pp. 595 -603, 1995.
- [4] Da Cunha Duarte. C., Barbi. I., "A new family of ZVS-PWM active-clamping DC-to-DC boost converters: analysis, design, and experimentation" IEEE Transactions on, Vol. 12, pp. 824 -831, 1997.
- [5] James. P. Noon., "UC3855 A-B High performance power factor regulator", Unitrode Application Note.